

Эффективность GaN-светодиодов и энергетическая релаксация носителей в квантовых ямах InGaN/GaN

Н. И. Бочкарева,* В. В. Вороненков,† Ю. Т. Ребане,‡ Ю. Г. Шретер§

Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН,
Россия, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
(Статья поступила 19.09.2013; Подписана в печать 28.04.2014)

Обнаружена прямая корреляция между уменьшением эффективности и изменениями высокоэнергетического крыла спектра излучения квантовых ям InGaN/GaN с ростом плотности тока. Предложена динамическая модель энергетической релаксации инжектированных носителей в экспоненциальных хвостах плотности состояний квантовых ям InGaN/GaN. При низких уровнях инжекции носители, захваченные в мелкие состояния хвостов, быстро перескакивают прямо в нижележащие по энергии состояния хвостов. Это приводит к сильной локализации носителей и высокоэнергетичной отсечке спектра излучения. При высоком уровне инжекции прыжковая термализация прямыми перескоками в глубокие состояния подавляется из-за частичного заполнения состояний хвоста. В результате отношение плотности подвижных и локализованных носителей увеличивается с током. Эффективность излучения уменьшается из-за увеличения латеральной диффузионной длины, захвата носителей дефектами и туннельно-рекомбинационной утечки через дефекты. Одновременно высокоэнергетичная отсечка спектра сдвигается к более высокой энергии. Таким образом, величина падения эффективности связана с относительным уширением спектра излучения.

PACS: 85.35.Be; 78.67.Lt; 73.63.Nm УДК: 538.91, 538.935, 538.938, 538.97

Ключевые слова: квантовые ямы, квантовая эффективность, нитрид галлия

Высокая внутренняя квантовая эффективность η_{IQE} GaN-светодиодов связывается с сильной локализацией носителей заряда на неоднородностях ширины запрещенной зоны в квантовых ямах InGaN/GaN, обеспечивающих изоляцию носителей заряда от дефектов [1–3]. Однако с ростом уровня инжекции η_{IQE} в квантовых ямах InGaN/GaN и в толстых слоях InGaN уменьшается. Дополнительные потери в энергетической эффективности (*power efficiency*) возникают при термализации носителей, инжектированных в активную область, приводя к дополнительному падению энергетической эффективности на 10–20%. Минимальные потери $\sim 3\%$ при термализации носителей может обеспечить только туннельная инжекция.

Мы исследовали уменьшение квантовой эффективности с ростом уровня инжекции в светодиодах различных производителей и обнаружили прямую корреляцию между эффективностью и формой линии излучения активной области InGaN с ростом уровня инжекции [4]. Форма спектра отражает форму распределения носителей в флуктуациях состава и ширины InGaN/GaN квантовой ямы, формирующих экспоненциальные хвосты состояний в InGaN, и характеризует степень локализации носителей в квантовой яме. Распределение локализованных носителей определяется:

1. особенностями инжекции в квантовые ямы InGaN/GaN;

2. быстрым перераспределением инжектированных носителей между состояниями хвоста до излучательной рекомбинации.

В работе представлены результаты, полученные на коммерческих белых светодиодах со световой отдачей $120 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$ при токе 350 мА и пиковой энергии излучения $h\nu_p = 2.85 \text{ эВ}$. Уменьшение эффективности с ростом плотности тока в диапазоне $j = 4\text{--}40 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ составляет 28%. Измерения эффективности и спектров излучения проводились в непрерывном режиме работы. Во избежание перегрева диоды монтировались на радиаторе, обеспечивающем постоянство температуры диода.

Для всех исследованных диодов зависимость напряжения на p - n -переходе от плотности тока может быть описана экспоненциальной функцией $j \sim \exp(qU_j/\eta kT)$, где $\eta(U_j)$ — фактор идеальности, kT — тепловая энергия (рис. 1). На рис. 1 приведены также зависимости внутренней квантовой эффективности и пиковой энергии от плотности тока. Видно, что η_{IQE} увеличивается с j в области малых токов I , где $U_j < h\nu_p/q$ и $\eta < 2$; начинает падать в области средних токов II , когда $U_j > h\nu_p/q$ и $\eta > 2$ и быстрее уменьшается в области больших токов III , где вновь $\eta < 2$.

Важно, что наблюдается корреляция между падением эффективности и голубым сдвигом пика спектра при $j < 15 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$. При $j > 15 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ эффективность продолжает уменьшаться, а пиковая энергия не меняется. Однако, как видно из нормализованных спектров излучения, наблюдается уширение и отсечка коротковолнового края спектра, а также уменьшение его наклона, рис. 2. Анализ результатов позволяет связать падение эффективности при $j < 15 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ с туннельной инжекцией в мелкие состояния хвоста с низкой

*E-mail: n.bochkareva@mail.ioffe.ru

†E-mail: vladvoronenkov@yandex.ru

‡E-mail: yrebane@yandex.ru

§E-mail: shreter@peterlink.ru

спектральной эффективностью излучения и инжекцией в квантовую яму при $j > 15 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$.

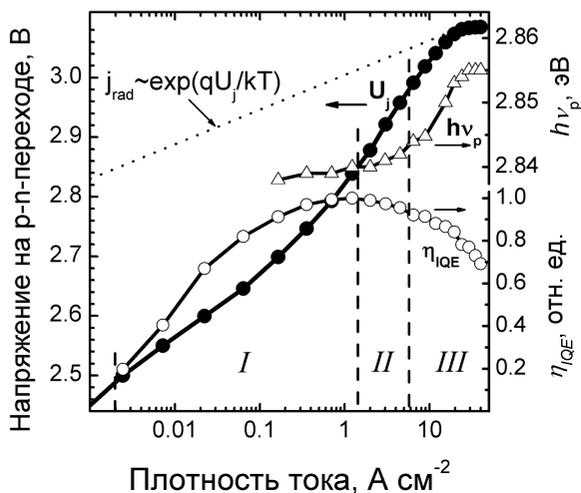


Рис. 1: Зависимости U_j , η_{IQE} и $h\nu_p$ от плотности тока. Штриховой линией показана зависимость U_j от плотности надбарьерного тока j_{QW} , связанного с излучательной рекомбинацией

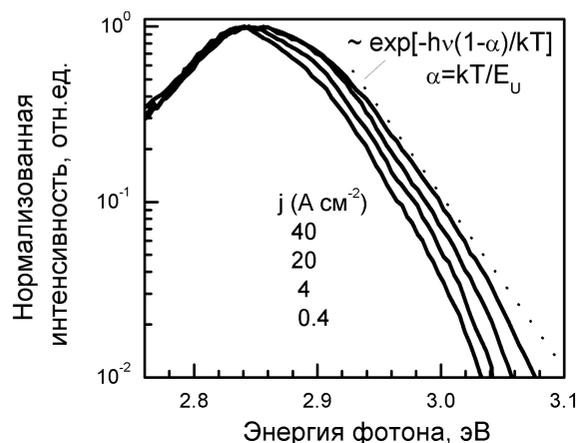


Рис. 2: Нормированные спектры излучения при различной плотности тока. E_U — урбаховская энергия

Мы предлагаем динамическую модель энергетической релаксации носителей, инжектированных в квантовую яму. Модель рассматривает два конкурирующих механизма термализации: прыжковый и термически активированный. Туннельная инжекция в глубокие состояния хвоста в квантовой яме InGaN/GaN при минимальной величине U_j может обеспечить максимальную глубину локализации носителей и их изоляцию от дефектов, и следовательно, максимальную квантовую и энергетическую эффективность. При низком уровне инжекции в мелкие состояния хвоста или в делокализованные состояния хвоста выше порога подвижности, высокая квантовая эффективность обеспечивается быстрой энергетической релаксацией носителей посредством прыжков из мелких состояний хвоста в более глубокие. Это увеличивает заселенность глубоких состояний и приводит к наблюдающейся отсечке спектра излучения со стороны высоких энергий. Падение эффективности с ростом уровня инжекции вызвано замедлением скорости прыжковой термализации при частичном заполнении состояний хвоста прямым захватом носителей с уровня подвижности. Наиболее быстрым процессом термализации становится тепловое возбуждение носителей из мелких состояний хвоста на порог подвижности с последующим захватом в более глубокие состояния. В результате с ростом накачки увеличивается отношение плотности подвижных и глубоко локализованных носителей, увеличивается диффузионная длина носителей и их захват дефектами (дислокациями; дислокациями, окруженными V-дефектами в квантовой яме, а также точечными дефектами), что при высоком уровне инжекции может привести к шунтированию n -барьера туннельной утечкой по дефектам. Одновременно отсечка спектра сдвигается к более высоким энергиям. Величина падения эффективности прямо связана с уширением спектра излучения. Этот механизм может также отвечать за уменьшение эффективности с ростом накачки в толстых слоях InGaN [5] и в неполярных светодиодных структурах [6], так как резкая отсечка, и уширение коротковолнового крыла спектра излучения с ростом накачки отчетливо видны в опубликованных спектрах излучения.

[1] Chichibu S.F., Uedono A., Onuma T., Haskell B.A., Chakraborty A., Koyama T., Fini P.T., Keller S., DenBaars S.P., Speck J.S., Mishra U.K., Nakamura S., Yamaguchi S., Kamiyama S., Amano H., Akasaki I., Han J., Sota T. Nature Mater. **5**. P.810. (2006).
 [2] Hangleiter A., Hitzel F., Netzel C., Fuhrmann D., Rossow U., Ade G., Hinze P. Phys. Rev. Lett. **95**. P.127402. (2005).
 [3] Кудряшов В.Е., Туркин А.Н., Юнович А.Э., Ковалев А.Н., Маняхин Ф.И. ФТП. **33**. С.445. (1999).
 [4] Bochhareva N.I., Voronenkov V.V., Gorbunov R.I.,

Zubrilov A.S., Lelikov Y.S., Latyshev P.E., Rebane Y.T., Tsyuk A.I., Shreter Y.G. Appl. Phys. Lett. **96**. P. 133502. (2010).
 [5] Shen Y.C., Mueller G.O., Watanabe S., Gardner N.F., Munkholm A., Krames M.R. Appl. Phys. Lett. **91**. P. 141101. (2007).
 [6] Chakraborty A., Haskell B.A., Keller S., Speck J.S., DenBaars S.P., Nakamura S., Mishra U.K. Appl. Phys. Lett. **85**. P.5143. (2004).

Efficiency of GaN light-emitting diodes and carrier energetic relaxation in InGaN/GaN quantum wells

N. I. Bochkareva^a, V. V. Voronenkov^b, Y. T. Rebane^c, Y. G. Shreter^d

A. F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 194021, Russia
E-mail: ^an.bochkareva@mail.ioffe.ru, ^bvladvoronenkov@yandex.ru, ^cyrebane@yandex.ru, ^dshreter@peterlink.ru

A direct correlation is found between efficiency droop and changes in the high energy side of emission spectrum of InGaN/GaN quantum wells (QWs) with increasing current density. A dynamic model of energy relaxation of injected carriers in exponential band tails of InGaN QWs is proposed. At low injection level the carriers trapped by shallow tail states quickly hop directly to lower-energy tail states. This results in the strong carrier localization and high-energy cutoff of emission spectrum. At higher injection level hopping directly to deeper states is suppressed due to the partial filling of tail states. As a result the ratio of mobile to localized carriers increases with current. The emission efficiency decreases because of the enhancement of lateral diffusion length, carrier capture by defects and tunnel-recombination leakage via defects. Simultaneously the high-energy cutoff of emission spectrum shifts to higher energy. Thus, the magnitude of efficiency droop is directly related to the relative broadening of emission spectrum.

PACS:85.35.Be; 78.67.Lt; 73.63.Nm

Keywords: quantum wells, quantum efficiency, gallium nitride.

Received 19.09.2013.

Сведения об авторах

1. Бочкарева Наталья Ивановна — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел. (812) 297-32-56, e-mail: n.bochkareva@mail.ioffe.ru.
2. Вороненков Владислав Валеевич — младший научный сотрудник; тел. (812) 297-32-56, e-mail: vladvoronenkov@yandex.ru.
3. Ребане Юрий Тоомасович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел. (812) 297-32-56, e-mail: yrebane@yandex.ru.
4. Шретер Юрий Георгиевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник; тел. (812) 297-32-56, e-mail: shreter@peterlink.ru.